



Оригинальная статья

УДК 621.365.5:669.187.2

DOI 10.17073/0368-0797-2022-2-85-91



НАМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ШИХТЫ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

Г. Е. Левшин

Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова (Россия, 656038, Алтайский край, Барнаул, пр. Ленина, 46)

Аннотация. Приведен анализ намагничивания и нагрева ферромагнитной шихты в тиглях индукционных печей двух видов. В индукторных печах шихта намагничивается вертикальным электромагнитным потоком, а в электромагнитных печах с изогнутым U -, C - или O -образным магнитопроводом (МПР) – горизонтальным потоком. Показана недостаточная изученность этих во многом общих процессов намагничивания. Отражена важность магнитной индукции B_i в материале шихты. Раскрыты трудности определения этого параметра при намагничивании одиночного куска шихты и связанных с ним других магнитных величин: индукции B_m и напряженности H_m размагничивающего поля, коэффициента размагничивания N , намагниченности M , магнитных проницаемостей вещества μ_i и тела μ_t , восприимчивости k_m и др. Трудности возрастают при намагничивании шихты, являющейся пористым телом с объемом V_t тигля и коэффициентом заполнения $K_v \leq 0,5$ этого объема ферромагнитными кусками. Оно также создает размагничивающее поле с индукцией $B_{\text{млт}}$ и напряженностью $H_{\text{млт}}$. Кроме того, поры оказывают дополнительное размагничивающее действие. Поэтому индукция $B_{\text{ит}}$ в пористом теле меньше индукции B_i в сплошном теле. Для сравнения намагничивания ферромагнитной шихты горизонтальным и вертикальным потоками частотой 50 Гц проведены моделирующие опыты с образцами неуплотненной дроби ДСЛ08 из высокоуглеродистой стали (ГОСТ 11964 – 83), имеющей величину $K_v \approx 0,53$. Образцы помещали в индуктор и между полюсами U -образного магнитопровода. Индукцию измеряли цилиндрическим и плоским зондами милитесламетра Ш1-15 в воздухе и в образце. Установлено преимущество электромагнитной печи над индукторной печью в более равномерном распределении индукции B_i в шихте и ее существенном превышении в 1,7 раза над индукцией B_e в рабочей полости печи, что свидетельствует о более эффективном использовании электромагнитной энергии в этой печи при нагреве. Предложен контроль индукции B_i при нагреве шихты методом амперметра-вольтметра с помощью измерительной катушки из нагревостойкой проволоки.

Ключевые слова: ферромагнитная шихта, намагничивание шихты, магнитная индукция, индукционный нагрев

Для цитирования: Левшин Г.Е. Намагничивание ферромагнитной шихты при индукционном нагреве // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 2. С. 85–91. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-85-91>

Original article

MAGNETIZATION OF FERROMAGNETIC CHARGE AT INDUCTION HEATING

G. E. Levshin

Polzunov Altai State Technical University (46 Lenina Ave., Barnaul, Altai Territory 656038, Russian Federation)

Abstract. The article presents analysis of magnetization and heating of ferromagnetic charge in crucibles of induction furnaces of two types. In inductor furnaces, the charge is magnetized by a vertical electromagnetic flow, and in electromagnetic furnaces with a curved U -, C -, or O -shaped magnetic circuit (MPR) – by a horizontal flow. Knowledge of these largely general magnetization processes is insufficient. B_i magnetic induction in charge material is rather important. There are difficulties in determining this parameter during magnetization of a single piece of charge and other magnetic quantities associated with it: B_m induction and N_m strength of the demagnetizing field, N demagnetization coefficient, M magnetization, magnetic permeabilities of μ_i substance and μ_t body, k_m susceptibility, etc. Difficulties increase at magnetization, if it is a porous body with crucible volume of $\sim V_t$ and a factor of filling with ferromagnetic pieces of this volume of $K_v \leq 0.5$. It also creates a demagnetizing field with B_{mlt} induction and H_{mlt} strength. Beyond that, pores have an additional demagnetizing effect. Therefore, the induction B_{it} in a porous body is less than the induction B_i in a solid one. To compare magnetization of ferromagnetic charge with horizontal and vertical flows with frequency of 50 Hz, modeling experiments were carried out with the samples of DSL08 unconsolidated shot from high-carbon steel (GOST 11964 – 83) with $K_v \approx 0.53$. The samples were placed in the inductor and between the poles of a U -shaped core piece. Induction was measured by a cylindrical and flat probe unit of Sh1-15 militeslameter in air and in the sample. An advantage of electromagnetic furnace over an inductor one is more uniform distribution of B_i induction in charge and its significant excess (1.7 times) over the B_e induction in a furnace working cavity, which indicates more efficient use of electromagnetic energy in this furnace during heating. The author proposed to control B_i induction when heating the charge by the ammeter-voltmeter method using measuring coil made of heat-resistant wire.

Keywords: ferromagnetic charge, charge magnetization, magnetic induction, induction heating

For citation: Levshin G.E. Magnetization of ferromagnetic charge at induction heating. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 2, pp. 85–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-85-91>

ВВЕДЕНИЕ

Для индукционной плавки ферромагнитной шихты без зумпфа предложены тигельные печи: индукторные с вертикальным электромагнитным потоком (1909 г.) и электромагнитные с горизонтальным электромагнитным потоком (2013 г.) [1, 2]. Рабочая полость в индукторных печах образована витками w однослойного цилиндрического индуктора, не имеющего конструктивно оформленных полюсов, а в электромагнитных печах – между полюсами изогнутого U -, C - или O -образного магнитопровода (МПр). Индукторные печи изучены более полно, особенно при плавке неферромагнитной шихты. Наиболее подробно эти вопросы изучены в работах 1960 – 1970-х гг. [3 – 5]. Однако основные теоретические вопросы рассмотрены в разных книгах и недостаточно обобщены и систематизированы.

Представляет научный и практический интерес систематизированное рассмотрение основных и важных вопросов намагничивания и нагрева ферромагнитной шихты в этих печах и их сравнение. Это целесообразно начать с поведения вещества ферромагнитного тела в магнитном поле (МП).

СИСТЕМНЫЕ ОСНОВЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ШИХТЫ

При рассмотрении теории нагрева в индукторных печах приняты модели тела в виде одного или нескольких «сплошных цилиндров» с поперечным сечением S , а также резе «круглой трубы». Их размещают в индукторе вертикально концентрично или параллельно его оси [4, 5].

При токе $I_{\text{пит}}$ частотой f , питающем индуктор с числом витков w , в нем создается рабочее МП с напряженностью H_e (индукцией B_e). В теле же с электрическим сопротивлением R_t возникает индукция B_i и индуцируется электрическое напряжение [2 – 6]

$$U_{\text{инд}} = 4,44 f B_i S. \quad (1)$$

Напряжение создает вихревые токи [2, 3]

$$I_v \approx \frac{U_{\text{инд}}}{R_t} < -I_{\text{пит}} w. \quad (2)$$

Токи создают индуцированное магнитное поле, ослабляющее рабочее МП, и нагревают тело за время t [2 – 6]:

$$Q = I_v^2 R_t t, \quad (3)$$

где Q – теплота.

Кроме того, ферромагнитные материалы нагреваются до температуры Кюри ($740 - 770^\circ\text{C}$) за счет тепловых потерь при их перемагничивании, величина которых возрастает с увеличением ширины петли гистерезиса. В начале нагрева ферромагнитная шихта потребляет примерно на 40 % больше мощности, чем немагнитная [3 – 6].

В этих условиях наибольшее значение вихревого тока I_v наблюдается на поверхности тела, а наименьшее – на его оси. При этом использовано понятие «глубина проникновения тока». Эта величина определяется по следующей формуле [3 – 6]:

$$\Delta_z \approx 503 \left(\frac{\rho}{\mu_i f} \right)^{0,5}, \quad (4)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление вещества тела, Ом·м; μ_i – относительная магнитная проницаемость вещества тела.

На глубине Δ_z выделяется 86,5 % всего индуцированного тепла. При величине $2\Delta_z$ выделяется примерно 97 % тепла. Для стали и чугуна при температуре 15°C сопротивление $\rho = 20 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, проницаемость $\mu_i \approx 40$, а глубина $\Delta_z \approx 5$ мм при частоте $f = 50$ Гц. Весьма важно, что при увеличении частоты f глубина Δ_z уменьшается. Например, при повышении величины f с 50 до 2500 Гц глубина Δ_z снижается в 12,5 раз [6].

Опытами установлено оптимальное соотношение $\eta \approx d/\Delta_z$ между поперечным размером d тела и глубиной Δ_z , а также его индуцированной мощностью $P_{\text{инд}}$ и массой m . При таком соотношении одинаковое воздействие поля с индукцией B_e на разные тела обеспечивает максимальную температуру и удельную индуцированную мощность $P_{\text{инд}}/m$. В опыте с пятью цилиндрами, размещенными в индукторе мощностью 25 кВт, при частоте 10 кГц это соотношение составляет для одного из них $\eta \approx d/\Delta_z \approx 3,5 \div 4,0$ [4 – 6]. Для тел другой формы соотношение отличается: для пластины $\eta \approx 2,5$, для шара немагнитного $\eta \approx 4,8$, а для ферромагнитного материала $\eta \approx \mu_i$ [5].

На поверхности тела выделяется индуцированная мощность [3 – 5]

$$P_{\text{инд}} = 2 \cdot 10^{-6} H_e^2 A_m (f \mu_i \rho)^{0,5}, \quad (5)$$

где $P_{\text{инд}}$ – мощность, кВт/см²; A_m – коэффициент, зависящий от соотношения $\eta \approx d/\Delta_z$ и учитывающий кривизну тела.

Легко видеть, что наибольшее влияние на величину $P_{\text{инд}}$ оказывает напряженность H_e (индукция B_e), а не частота f .

На основании соотношения $\eta \approx d/\Delta_3$ предложены оптимальные диаметры d кусков шихты из углеродистой стали в зависимости от частоты f : $d = 320, 99, 50, 23$ мм при 50, 500, 2000 и 10 000 Гц [5].

При нагреве ферромагнитного тела неравномерность распределения плотности тока по его сечению выражена сильнее, чем немагнитного. Большая потребляемая мощность и более высокая концентрация тепла позволяют нагревать эту шихту с большей скоростью [5, 7].

Анализ уравнений (1) – (3) показывает, что напряжение $U_{\text{инд}}$, ток $I_{\text{в}}$ и теплота Q (при известных или заданных величинах f , S и $R_{\text{т}}$) определяются значением индукции B_i внутри тела. Следовательно, индукция является важнейшей магнитной характеристикой индукционного нагрева, но, к сожалению, и трудноопределимой как инженерным расчетом, так и опытным путем. Поэтому она не применяется на практике, а плавку ведут по косвенным электрическим параметрам (коэффициенту мощности $\cos \phi$, напряжению $U_{\text{пит}}$, току $I_{\text{пит}}$). Ниже представлены эти трудности.

1. Электромагнитное поле обычного индуктора с высотой $h_{\text{инд}}$ и числом витков w является неоднородным с максимальной индукцией $B_{\text{ец}}$ в геометрическом центре рабочей полости индуктора и постепенно уменьшающимся по высоте к его краям (торцам) до значения $B_{\text{еп}} \approx B_{\text{ец}}/2$. Эту неоднородность трудно учесть [5, 8]. Индукцию $B_{\text{ец}}$ можно определить по следующей формуле:

$$B_{\text{ец}} = \frac{I_{\text{пит}} w \mu_0}{h_{\text{инд}}}, \quad (6)$$

где $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Г/м – магнитная постоянная.

Важно, что в печи ИЧТ-31 проектная индукция при 50 Гц составляет примерно 266 мТ (напряженность $H_e = 211\,968$ А/м), а в печах меньшей вместимости еще меньше [5, 6].

2. При помещении ферромагнитного тела с проницаемостью μ_i (восприимчивостью k_m) его вещества в постоянное или переменное МП с индукцией B_e (напряженностью H_e) оно намагничивается, превращаясь в магнит с полюсами и собственным (размагничивающим) магнитным полем B_m (H_m), направленным против намагничивающего (основного) поля B_e , ослабляя его. Это приводит к тому, что индукция B_i (напряженность H_i) в середине тела значительно меньше, чем на полюсах.

В постоянном магнитном поле напряженность H_m пропорциональна намагниченности M и определяется как [9, 10]

$$H_m = NM, \quad (7)$$

где N – коэффициент размагничивания, определяемый в основном экспериментально (для тонкого диска равен

примерно 1, для шара – 0,333, для длинного цилиндра еще меньше).

С учетом этого напряженность H_i , действующую в теле, можно найти по следующей формуле:

$$H_i = H_e - H_m = H_e - NM, \quad (8)$$

где $M = k_m H_i = (\mu_i - 1)H_i$.

Связь индукции B_i и напряженности H_i внутри тела определяется формулой

$$B_i = \mu_0 \mu_i H_i. \quad (9)$$

Величина μ_i не является постоянной, а изменяется по нелинейной (экстремальной) зависимости $B_i = f(H_i)$, а также уменьшается с повышением температуры.

Кроме того, проницаемость μ_i вещества тела уменьшается до значения проницаемости собственно тела μ_t , определяемого из соотношения [9, 10]

$$\mu_t = \frac{\mu_i}{1 + N(\mu_i - 1)}. \quad (10)$$

Тогда индукция B_i в теле связана с внешней индукцией B_e как

$$B_i = \mu_t B_e. \quad (11)$$

Для неферромагнитных материалов (алюминия, меди и их сплавов) $\mu_t \approx \mu_i \approx 1$ и поэтому $B_i \approx B_e$. Это облегчает расчетное изучение их нагрева.

3. Особо отметим, что определение величин B_m , H_m , N , M , μ_i , μ_t , k_m в постоянном магнитном поле является неординарной задачей. В случае же переменного поля возникают дополнительные трудности даже при намагничивании одиночного тела в индукторе печи. Однако вышеперечисленные качественные зависимости в основном близки в обоих случаях.

4. Шихта состоит из многих тел (кусков) различных размеров и формы, часто помещается в рабочем объеме V_t тигля навалом (особенно в крупных печах). При этом образуется пористое тело объемом примерно V_t с пористостью 0,5 и более и коэффициентом заполнения этого объема ферромагнитным веществом $K_v \leq 0,5$. Это тело также создает размагничивающее поле с индукцией $B_{\text{мп}}$ и напряженностью $H_{\text{мп}}$. Кроме того, поры тоже оказывают размагничивающее действие и поэтому составляющие пористое тело куски намагничиваются в меньшей степени, чем одиночный кусок [11]. Из-за этого индукция $B_{\text{ипт}}$ и напряженность $H_{\text{ипт}}$ в пористом теле меньше, чем в сплошном теле, то есть величина $B_{\text{ипт}}$ меньше B_i , а $H_{\text{ипт}}$ меньше H_i . Это видно из выражения для определения коэффициента размагничивания пористого материала с восприимчивостью $k_{\text{мп}}$ [11]

$$N_{\text{пт}} \approx \frac{1}{k_{\text{мп}}} - \frac{1}{k_m}.$$

Из-за перечисленных трудностей измерения характеристик в реальных печах получает распространение математическое и физическое моделирование нагрева ферромагнитных тел и шихты, но с определением электрических параметров [12 – 19].

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для сравнения намагничивания шихты горизонтальным и вертикальным электромагнитными потоками частотой 50 Гц проведены моделирующие опыты по намагничиванию моделирующей шихты в виде неуплотненной дроби ДСЛ08 из высокоуглеродистой стали (ГОСТ 11964 – 83). Ее дробинки практически шарообразны, объемная масса $4,15 \text{ г/см}^3$, а коэффициент заполнения объема $K_v \approx 0,53$ (при пористости 0,47) немного превышает значение K_v мелкокусковой шихты. При намагниченности дроби $M = 50 \text{ кА/м}$ напряженность внутри частицы $H_i = 0,26 \text{ кА/м}$, а внутри дроби $H_m = 6 \text{ кА/м}$; восприимчивость в частице $k_m = 192,3$, а в дроби $k_{mn} = 8,33$; коэффициент размагничивания $N_n = 0,115$ [11].

В случае индуктора в виде электрической катушки (ЭК) индукция измерена цилиндрическим зондом диам. 4 мм с датчиком Холла милитесламетра Ш1-15 сначала в центре и на верхнем уровне рабочей полости ЭК (ее предполагаемых полюсах), а затем в центре образца (диам. 43 мм, высотой 50 мм) и на его поверхности (рис. 1).



Рис. 1. Измерение индукции B_{ic} в центре образца дроби

Fig. 1. Measurement of B_{ic} induction in the center of the shot sample

Результаты показаны прямолинейными графиками на рис. 2.

В электромагнитной печи с U-образным магнитопроводом расстояние $l_{\text{раб}}$ составило 90 мм между его полюсами, длина образца дроби – 76 мм (рис. 3). Между его торцами (полюсами) и полюсами магнитопровода обеспечены воздушные зазоры по 7 мм, имитирующие неферромагнитные стенки тигля, то есть воздушный зазор 90 мм сокращен до двух зазоров по 7 мм. Весьма важно, что пористый образец стал частью магнитной цепи с двумя зазорами (в отличие от индукторной печи, где цепи нет). Индукция B измерена плоским зондом с датчиком Холла сечением $5 \times 1 \text{ мм}$ милитесламетра Ш1-15 в указанных на схеме точках 1 – 5 сначала в воздухе, а затем в точках 2 – 4 образца дроби после его размещения между полюсами магнитопровода (рис. 3). При этом в точках 1 и 5 измерена индукция B_n на полюсах ЭМ как при наличии образца дроби, так и без него. Результаты представлены на рис. 4¹.

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ намагничивания образца дроби в ЭК (например, при токе 4 А) показывает (рис. 2):

– индукция B_{ec} в центре полости ЭК в 1,45 раза больше, чем индукция B_{en} на ее торце, что обеспечивает существенные неоднородность магнитного поля и градиента $B_e = 0,99 \text{ мТ/мм}$, направленного от полюсов к центру ЭК;

– индукция B_{ic} в центре образца почти в 2 раза меньше, чем индукция B_{ec} в центре полости ЭК (42 против 80 мТ);

¹ Работа проведена при участии Р.М. Гайнулина и П.А. Навалихина.

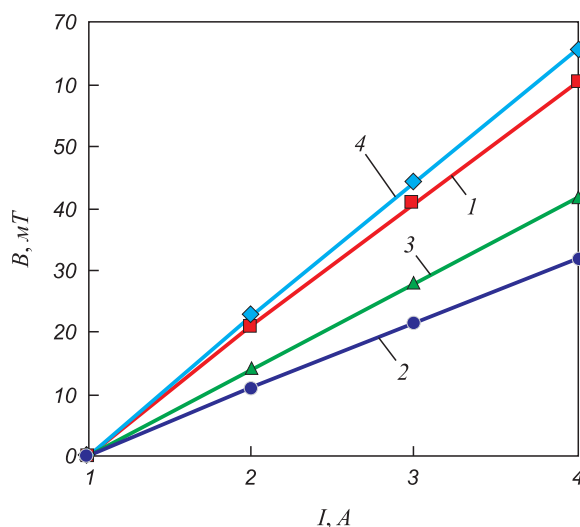


Рис. 2. Зависимость B_{ec} (1), B_{ic} (2), B_{en} (3) и B_{in} (4) от силы тока

Fig. 2. Graphs of B_{ec} (1), B_{ic} (2), B_{en} (3) and B_{in} (4) dependence on current intensity

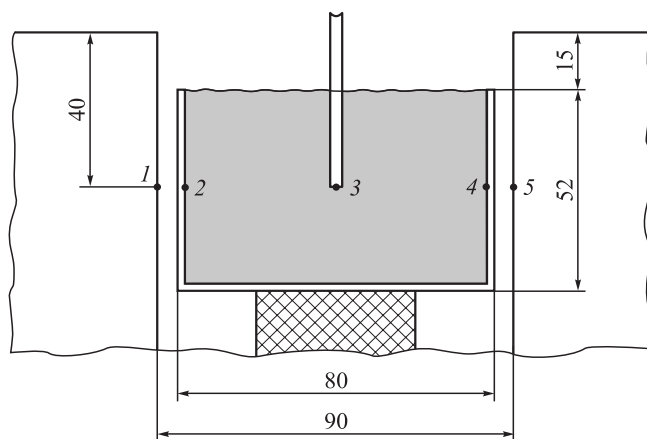


Рис. 3. Схема измерений индукций B_e и B_i в точках 1, 5 и 2 – 4

Fig. 3. Scheme of B_e and B_i inductions measurements at points 1, 5 and 2 – 4

- индукция B_{in} на полюсе образца в 1,54 раза больше, чем индукция B_{ep} в этой же точке в воздухе;
- индукция B_{in} на полюсе образца значительно (в 2 раза) и закономерно превышает индукцию B_{in} внутри образца.

Анализ намагничивания дробы в электромагните показывает следующее (рис. 4):

- малую неоднородность распределения индукции B_e в воздухе между полюсами магнитопровода и ее величину в пределах 33,3 – 37,6 мТ с незначительным градиентом $B_e = 0,096$ мТ/мм, направленным от середины $l_{раб}$ к полюсам;
- резкое увеличение индукции B_e на полюсах магнитопровода от 37,6 до 103,6 мТ (почти в три раза) при размещении образца между полюсами;
- резкое снижение индукции B_e в зазоре 7 мм между полюсами магнитопровода и полюсами образца (от 103,6 до 58 – 62 мТ);
- повышение индукции B_i в дробе по сравнению с индукцией B_e между полюсами магнитопровода без дробы (58 – 62 мТ против 33,3 – 37,6 мТ, то есть в среднем в 1,7 раза) и сравнительно равномерное ее значение по длине образца между его полюсами.

Образец дробы намагничивается в ЭК слабо и очень неравномерно (примерно в два раза сильнее, чем в центре). Это обуславливает аналогичный неравномерный нагрев шихты, что свидетельствует о малоэффективном использовании электрической и магнитной энергий, создаваемых индуктором, для нагрева ферромагнитной шихты.

Увеличение индукции на полюсах магнитопровода электромагнита (примерно в три раза) и образце дробы (примерно в 1,7 раза) вполне закономерно и наблюдается в других случаях размещения ферромагнитного тела (тигля) между полюсами электромагнита с образовани-

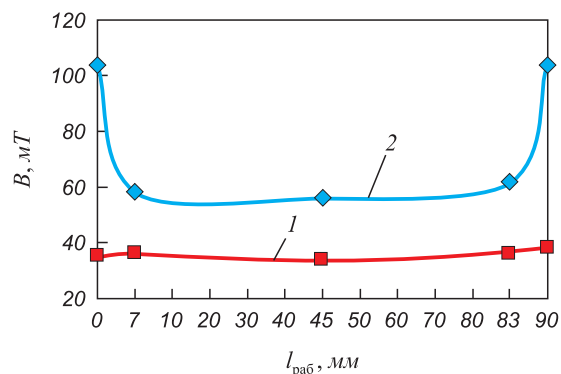


Рис. 4. Распределение индукции B_e (1) и B_i (2) между полюсами магнитопровода

Fig. 4. Distribution of B_e (1) and B_i (2) induction between poles of magnetic core

ем двухззорной магнитной цепи. Это свидетельствует о более эффективном использовании электромагнитной энергии печи при нагреве ферромагнитных шихты и тигля (по сравнению с индукторными печами).

Определение индукции B_i в нагреваемой шихте датчиками Холла, феррозондовыми и др. невозможно из-за их малой нагревостойкости. Эта трудность преодолена при измерении индукции B_i методом амперметра-вольтметра, когда измерительная ЭК из тугоплавкой проволоки размещается на полюсе магнитопровода или охватывает его полюсную часть [20]. В индукторной печи эту ЭК целесообразно разместить в «подовом камне», вокруг тигля или в его днище [20].

Выводы

Процесс намагничивания при индукционном нагреве ферромагнитной шихты еще недостаточно изучен вследствие перечисленных и пока непреодоленных трудностей, особенно при определении важного магнитного параметра – индукции B_i в материале шихты. Моделированием намагничивания шихты в двухззорной магнитной цепи установлено преимущество электромагнитной печи над индукторной в более равномерном распределении индукции B_i в шихте и ее существенном превышении (в 1,7 раза) над индукцией B_e в рабочей полости печи. Это обуславливает большую эффективность нагрева ферромагнитной шихты (по сравнению с индукторными печами). Определение индукции B_i при нагреве шихты позволит получить достоверную информацию для управления этим процессом и уточнения рекомендаций по размерам кусков шихты и их размещению в тигле. Ее предложено контролировать методом амперметра-вольтметра с помощью измерительной катушки из нагревостойкой проволоки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Mühlbauer A. *History of Induction Heating and Melting*. Essen, 2008. 202 p.
2. Левшин Г.Е. Наукоемкие технологии индукционной плавки в индукторных и электромагнитных тигельных печах // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2016. № 3. С. 12–21.
3. Фарбман С.А., Колобнев И.Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1968. 496 с.
4. Брокмайер К. Индукционные плавильные печи / Пер. с нем. М.: Энергия, 1972. 304 с.
5. Егоров А.В., Моржин А.Ф. Электрические печи. М.: Металлургия, 1975. 352 с.
6. Электрические печи для выплавки черных и цветных сплавов / Л.М. Романов, А.Н. Болдин, А.Н. Граблев, Д.П. Михайлов. М.: МГИУ, 2007. 104 с.
7. Современные плавильные агрегаты. В кн.: Сб. ИТЦМ «Металлург». М.: Металлург-консалтинг, 2014. 370 с.
8. Левшин Г.Е. Определение магнитной индукции индуктора тигельной печи // Ползуновский альманах. 2016. № 4. С. 131–136.
9. Rudnev V., Loveless D., Cook R.L. *Handbook of Induction Heating*. New York: CRC Press, 2017. 772 p.
<https://doi.org/10.1201/9781315117485>
10. Levshin G.E. The magnetic permeability of a magnetized “ferromagnetic material – air” two-phase dispersed system // *Electrical Technology Russia*. 2002. No. 1. P. 52–62.
11. Levshin G.E. Demagnetizing effect of a dispersed medium // *Electrical Technology*. 1997. No. 2. P. 103–109.
12. Kuvaldin A., Fedin M., Generalov I. Determination electrical parameters lumpy ferromagnetic charge when heated to the Curie point // *Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved)* 5. 2017, vol. 62, no. 1, pp. 85–92.
13. Bay F., Labbe V., Favenne Y., Chenot J.L. A numerical model for induction heating processes coupling electromagnetism and thermomechanics // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2003. Vol. 58. No. 6. P. 839–867.
<https://doi.org/10.1002/nme.796>
14. Drobenko B., Hachkevych O., Kournyts'kyi T. Thermomechanical behavior of polarizable and magnetizable electroconductive solids subjected to induction heating // *Journal of Engineering Mathematics*. 2008. Vol. 61. No. 2-4. P. 249–269.
<https://doi.org/10.1007/s10665-008-9216-4>
15. Glebov A.O., Karpov S.V., Karpushkin S.V., Malygin E.N. Modeling the induction heating of press equipment in an automatic-temperature-control mode // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019. Vol. 92. No. 5. P. 1130–1141.
16. Kurek K., Lochina W. Controlling the continuous induction heating process of the ferromagnetic charge. In: *Electromagnetic Fields in Electrical Engineering: Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2002. Vol. 22. P. 462–467.
17. Di Luzzo N., Fontana M., Arcondi B. Modelling of induction heating of carbon steel tubes: Mathematical analysis, numerical simulation and validation. // *Journal of Alloys and Compounds*. 2012. Vol. 536. Supl. 1. P. S564–S568.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.12.084>
18. Zabet A., Mohamadi Azghandi S.H. Simulation of induction tempering process of carbon steel using finite element method // *Materials & Design*. 2012. Vol. 36. P. 415–420.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.052>
19. Kuvaldin A.B., Fedin M.A., Generalov I.M. Physical model for definition of characteristics of the induction crucible furnace when heating ferromagnetic lumpy charge // *Journal Induction Heating*. 2015. No. 1 (28). P. 3–8.
20. Левшин Г.Е. Определение индукции в электромагнитной печи ЭМУ-5,7-60М методом амперметра-вольтметра // Ползуновский альманах. 2016. № 4. С. 85–88.
1. Mühlbauer A. *History of Induction Heating and Melting*. Essen, 2008, 202 p.
2. Levshin G.E. High-tech technologies of induction melting in inductor and electromagnetic crucible furnaces. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2016, no. 3, pp. 12–21. (In Russ.).
3. Farbman S.A., Kolobnev I.F. *Induction Furnaces for Melting Metals and Alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1968, 496 p. (In Russ.).
4. Brokmeier K.-H. *Induktives Schmelzen*. Essen: W. Girardet, 1966. (In Germ.).
5. Egorov A.V., Morzhin A.F. *Electric Furnaces*. Moscow: Metallurgiya, 1975, 352 p. (In Russ.).
6. Romanov L.M., Boldin A.N., Grablev A.N., Mikhailov D.P. *Electric Furnaces for Ferrous and Non-Ferrous Alloys Smelting*. Moscow: MSIU, 2007, 104 p. (In Russ.).
7. Modern melting units. In: *Collection of ETCM “Metallurg”*. Moscow: Metallurg-consulting, 2014, 370 p. (In Russ.).
8. Levshin G.E. Determination of magnetic induction of a crucible furnace inductor. *Polzunovskii al'manakh*. 2016, no. 4, pp. 131–136. (In Russ.).
9. Rudnev V., Loveless D., Cook R.L. *Handbook of Induction Heating*. New York: CRC Press, 2017, 772 p.
<https://doi.org/10.1201/9781315117485>
10. Levshin G.E. The magnetic permeability of a magnetized “ferromagnetic material – air” two-phase dispersed system. *Electrical Technology Russia*. 2002, no. 1, pp. 52–62.
11. Levshin G.E. Demagnetizing effect of a dispersed medium. *Electrical Technology*. 1997, no. 2, pp. 103–109.
12. Kuvaldin A., Fedin M., Generalov I. Determination electrical parameters lumpy ferro-magnetic charge when heated to the Curie point. *Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved)* 5. 2017, vol. 62, no. 1, pp. 85–92.
13. Bay F., Labbe V., Favenne Y., Chenot J.L. A numerical model for induction heating processes coupling electromagnetism and thermomechanics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2003, vol. 58, no. 6, pp. 839–867.
<https://doi.org/10.1002/nme.796>
14. Drobenko B., Hachkevych O., Kournyts'kyi T. Thermomechanical behavior of polarizable and magnetizable electroconductive solids subjected to induction heating. *Journal of Engineering Mathematics*. 2008, vol. 61, no. 2-4, pp. 249–269.
<https://doi.org/10.1007/s10665-008-9216-4>
15. Glebov A.O., Karpov S.V., Karpushkin S.V., Malygin E.N. Modeling the induction heating of press equipment in an automatic-temperature-control mode. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019, vol. 92, no. 5, pp. 1130–1141.
16. Kurek K., Lochina W. Controlling the continuous induction heating process of the ferromagnetic charge. In: *Electromagnetic Fields in Electrical Engineering: Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2002, vol. 22, pp. 462–467.
17. Di Luzzo N., Fontana M., Arcondi B. Modelling of induction heating of carbon steel tubes: Mathematical analysis, numerical simulation and validation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2012, vol. 536, suppl. 1, pp. S564–S568.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.12.084>
18. Zabet A., Mohamadi Azghandi S.H. Simulation of induction tempering process of carbon steel using finite element method. *Materials & Design*. 2012, vol. 36, pp. 415–420.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.052>
19. Kuvaldin A.B., Fedin M.A., Generalov I.M. Physical model for definition of characteristics of the induction crucible furnace when heating ferromagnetic lumpy charge. *Journal Induction Heating*. 2015, no. 1 (28), pp. 3–8.
20. Levshin G.E. Determination of induction in EMF-5,7-60 M electro-magnetic furnace by ammeter-voltmeter method. *Polzunovskii al'manakh*. 2016, no. 4, pp. 85–88. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Геннадий Егорович Левшин, д.т.н., профессор кафедры «Машино-
строительные технологии и оборудование», Алтайский госу-
дарственный технический университет имени И.И. Ползунова
E-mail: levshing@mail.ru

Gennadii E. Levshin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Engineering
Technology and Equipment”, Polzunov Altai State Technical University
E-mail: levshing@mail.ru

Поступила в редакцию 25.09.2021
После доработки 13.10.2021
Принята к публикации 19.10.2021

Received 25.09.2021
Revised 13.10.2021
Accepted 19.10.2021
